

Primljen / Received: 1.10.2019.

Ispravljen / Corrected: 22.1.2020.

Prihvaćen / Accepted: 30.3.2020.

Dostupno online / Available online: 10.6.2020.

Obrada zavarenih priključaka metodom mehaničkog udara visokom frekvencijom

Autori:



Boris Fuštar, dipl.ing.građ.
Institut IGH, d.d.
boris.fustar@igh.hr



Doc.dr.sc. **Ivan Lukačević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
ica@grad.hr
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Darko Dujmović**, dipl.ing.građ.
Akademija tehničkih znanosti Hrvatske
darko54dujmovic@gmail.com
Redoviti profesor u mirovini

Pregledni rad

Boris Fuštar, Ivan Lukačević, Darko Dujmović

Obrada zavarenih priključaka metodom mehaničkog udara visokom frekvencijom

Kod zavarenih konstrukcija, oštećenja umorom najčešće nastaju na mjestima zavora, koji predstavljaju geometrijske i materijalne diskontinuitete. Zbog toga su razvijene metode obrade zavora nakon zavarivanja. Jedna od relativno novih metoda obrade je metoda mehaničkog udara visokom frekvencijom. Ta metoda utječe na promjenu geometrije zavora, lokalno povećanje tvrdoće te uklanjanje nepovoljnih zaostalih naprezanja nastalih procesom zavarivanja. U radu se daje pregled navedene metode te se ističu područja koja zahtijevaju dodatna razmatranja.

Ključne riječi:

zavareni priključci, umor, obrada zavora nakon zavarivanja, HFMI

Subject review

Boris Fuštar, Ivan Lukačević, Darko Dujmović

High-Frequency mechanical impact treatment of welded joints

In welded structures, fatigue damage often occurs in welds, which are the points of geometrical and material discontinuity. Accordingly, post-weld treatment methods have been developed. One of the relatively new methods is the high-frequency mechanical impact treatment. The method is characterised by the change in weld geometry, local increase in hardness, and elimination of residual stresses generated by the welding process. An overview of this method is provided, and areas requiring further consideration are highlighted.

Key words:

welded joints, fatigue, post-weld treatment, HFMI

Übersichtsarbeit

Boris Fuštar, Ivan Lukačević, Darko Dujmović

Bearbeitung von Schweißverbindungen mittels der mechanischen Hochfrequenzmethode

Bei verschweißten Konstruktionen entstehen Ermüdungsschäden am häufigsten an den Schweißnähten, die eine geometrische und materielle Diskontinuität darstellen. Deshalb wurde die Bearbeitungsmethode der Schweißnaht nach dem Schweißen entwickelt. Eine der relativ neuen Bearbeitungsmethoden ist die mechanische Hochfrequenzmethode. Diese Methode beeinflusst die Geometrie der Schweißnaht, die lokale Erhöhung der Härte sowie die Beseitigung der ungünstigen Restspannung, die durch den Schweißprozess entsteht. In der Abhandlung wird eine Übersicht der angeführten Methode gegeben und hebt Bereiche hervor, die zusätzliche Betrachtungen erfordern.

Schlüsselwörter:

Schweißverbindung, Ermüdung, Bearbeitung der Schweißnaht nach dem Schweißen, HFMI

1. Uvod

Umor je progresivna i lokalizirana pojava postupnog oštećenja materijala uslijed dugotrajnih periodički promjenjivih opterećenja, odnosno, naprezanja. Pri tome je iznos promjenjivih naprezanja znatno ispod granice popuštanja materijala. Životni vijek konstrukcijskog elementa izloženog umoru sastoji se od perioda nastanka pukotine na površini elementa te perioda širenja pukotine sve do otkazivanja (slika 1.). Više o mehanizmu umora može se pronaći u radu [1].



Slika 1. Rast pukotine s brojem promjena ciklusa opterećenja

Umor najčešće nastaje na mjestima visokih koncentracija naprezanja kao što su zavareni priključci, koji predstavljaju geometrijske i materijalne diskontinuitete unutar konstrukcije. Ovdje se napominje da je u skladu s europskim normama za čelične konstrukcije u radu korišten termin "zavareni priključak" (eng. *welded joint*), dok se primjerice u području zavarivanja često koristi i termin "zavareni spoj". Zavarivanje je složen metalurški proces koji rezultira nepravilnom geometrijom, nesavršenostima unutar materijala te zaostalim naprezanjima u području zavara. Geometrijski i materijalni diskontinuiteti znatno smanjuju životni vijek zavarenih priključaka kod umora, a posebice period nastanka pukotine [2-5]. Pukotina se iz materijalnih diskontinuiteta mikroskopske veličine može početi širiti već s prvim ciklusom opterećenja. Unatoč tome što zavari predstavljaju kritična mjesta otkazivanja konstrukcija iz aspekta umora, zavarivanje je danas najrašireniji i najčešći način spajanja ciklički opterećenih čeličnih konstrukcija poput čeličnih mostova. Problem umora postaje još značajniji ako se primjenjuju čelici visoke čvrstoće. Čelici visoke čvrstoće omogućuju smanjenje dimenzija elemenata i olakšavaju konstrukciju, što dovodi do puno većeg utjecaja promjenjivog dijela opterećenja koje uzrokuje oštećenja umorom. Naime, otpornost na umor neobrađenih zavarenih priključaka ne

ovisi o čvrstoći čelika osnovnih materijala koji se spajaju. Vodeći parametri su uglavnom globalna i lokalna geometrija priključka. Stoga se povećanjem granice popuštanja čelika ne povećava otpornost zavarenog priključka na umor. Iz tog razloga, kriterij umora postaje vodeći problem kod dimenzioniranja ciklički opterećenih čeličnih konstrukcija pa je zbog toga mjerodavan za odabir konačnih dimenzija elemenata poput debljine ploča, ukrućenja, procesa zavarivanja i ostale geometrije.

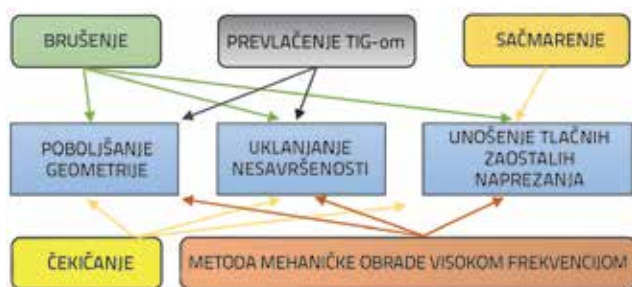
Zbog svega navedenog, otpornost zavarenih konstrukcija na umor je i danas jedna od vodećih istraživačkih tema [6]. Kako bi se povećala otpornost konstrukcije na umor, potrebno je koristiti priključke s nižim faktorom koncentracije naprezanja, predviđati zavare u područjima manjih naprezanja, pravilno odabirati materijal, proces zavarivanja itd. Postoje brojne norme i smjernice koje olakšavaju projektiranje čeličnih konstrukcija iz aspekta umora [7-11]. Metode za rješavanje problema umora su i povećanje učestalosti broja pregleda kako bi se pravodobno detektirala oštećenja, ograničavanje opterećenja, ojačanja konstrukcijskih elemenata te njihova zamjena. U pojedinim slučajevima buše se i rupe u zarezima pukotine kako bi se smanjenjem koncentracije naprezanja povećala otpornost priključka na umor.

U nekim se pak slučajevima, uz prethodno spomenute preporuke i norme, ne može postići zadovoljavajuća otpornost zavarenih priključaka na umor. Zbog toga su u zadnje vrijeme razvijene metode obrade zavara nakon zavarivanja (eng. *Post Weld Treatment* - PWT) kojima se uklanjanju nesavršenosti, poboljšava geometrija zavara te unošenjem tlačnih zaostalih naprezanja uklanjaju nepovoljna vlačna zaostala naprezanja koja nastaju procesom zavarivanja [12]. Time se postižu dodatna poboljšanja otpornosti zavarenih priključaka na umor [6], slika 2. Na ovaj način se omogućuje potpuna iskoristivost čelika visoke čvrstoće ($f_y > 355$ MPa). Metode obrade se mogu primjenjivati odmah nakon zavarivanja ili tijekom uporabe (sanacija postojećih konstrukcija). Kod postojećih konstrukcija to može biti veoma učinkovito jer su sva naprezanja od stalnih opterećenja već unesena prije obrade [13]. Detaljne informacije i preporuke u slučaju čeličnih i aluminijevskih konstrukcija mogu se pronaći u IIW smjernicama [14]. Otpornost zavarenih priključaka na umor ovisi o početnoj veličini i obliku nesavršenosti unutar zavara, iz koje se širi pukotina [15]. Obrada zavarenih priključaka uklanja geometrijske i materijalne nesavršenosti te produljuje period nastanka pukotine u ukupnom životnom vijeku priključka (slika 2.) [6]. Metode obrade zavara nakon zavarivanja su jednostavne i učinkovite metode koje u pojedinim slučajevima zbog različitih ograničenja postaju jedini mogući način poboljšanja otpornosti na umor.



Slika 2. Način postizanja visoke otpornosti na umor

Metode obrade zavora nakon zavarivanja mogu se podijeliti u dvije skupine. Kod prve skupine se modificira rub zavora te se na taj način smanjuju koncentracije naprezanja osiguravanjem "blažeg" prijelaza između lica zavora i elemenata koji se spajaju. Na taj se način produljuje period nastanka pukotine u životnom vijeku priključka. Najpoznatije metode iz ove skupine su prevlačenje TIG-om i brušenje, a više o njima se može pronaći u literaturi [16-18]. Kod druge skupine metoda modificiraju se zaostala naprezanja i time se uklanjaju nepovoljna vlačna naprezanja koja nastaju procesom zavarivanja. Ove metode također modificiraju i rub zavora pa smanjuju i koncentracije naprezanja kao u slučaju prve skupine. Najpoznatije metode ove skupine jesu sačmarenje, čekićanje te zadnje razvijena i sve češća metoda mehaničke obrade visokom frekvencijom, tzv. HFMI metoda (eng. *High Frequency Mechanical Impact*) [6, 14]. Slika 3. daje pregled mogućnosti poboljšanja ruba zavora s obzirom na spomenute metode poboljšanja [14].



Slika 3. Mogućnosti poboljšanja zavora s obzirom na metode poboljšanja

U ovom radu se razmatra HFMI (eng. *High Frequency Mechanical Impact*) metoda koja se svrstava u metode modifikacije zaostalih naprezanja, ali se također modificira i lokalna geometrija zavarenog priključka te lokalno utječe na povećanje tvrdoće i granice popuštanja materijala na rubu zavora [19].

2. Metoda mehaničke obrade zavora visokom frekvencijom

Metoda mehaničke obrade zavora visokom frekvencijom (HFMI metoda) relativno je nova i učinkovita skupina postupaka



Slika 4. Primjer HFMI uređaja i različitih dostupnih glava [12]

obrade zavora koja je danas sve popularnija i sve se više koristi u praksi [6, 14]. Početak primjene HFMI metode potječe iz bivšeg Sovjetskog Saveza [20, 21]. Unatoč svim pozitivnim učincima, implementacija ove metode na velike konstrukcije relativno je spora. HFMI metoda obuhvaća različite postupke poput *Ultrasonic Peening Treatment* (UPT) [22, 23], *Ultrasonic Impact Treatment* (UIT) [23-25], *High Frequency Impact Treatment* (HiFIT), *Ultrasonic Peening* (UP), *Pneumatic Impact Treatment* (PIT) [26] i *Ultrasonic Needle Peening* (UNP) [27]. HFMI metoda produžuje životni vijek priključka i do 18 puta u usporedbi s neobrađenim priključcima [6]. HFMI obrade imaju najveći doprinos kod priključaka izloženih velikom broju promjena naprezanja, a primjena HFMI obrade u projektiranju novih konstrukcija može rezultirati lakšim i pouzdanijim konstrukcijama [28].

Proteklih desetak godina razvijeno je mnogo komercijalnih uređaja za HFMI obradu, a njihov se broj i dalje povećava. Ultrazvučni i pneumatski uređaji se obično sastoje od izvora energije i alata s glavama različitih oblika. Glave su izrađene od čelika visoke čvrstoće te su proizvođači s vremenom prilagodili oblik za što bolji učinak. Slika 4. prikazuje primjer HFMI uređaja i glave različitih oblika [12].

Princip rada HFMI uređaja je taj da izvor energije pod visokom frekvencijom pokreće piezoelektrične elemente, ultrazvučne magnetostriktivne elemente ili komprimirani zrak. Cilindrične glave se osciliraju ubrzavaju i udaraju u komponentu konstrukcije (rub zavora) visokom frekvencijom (> 90 Hz). Pozitivan učinak nastaje zbog udarne energije pri svakom pojedinom udaru koja je određena brzinom (frekvencijom) i pokretnom masom [12]. Slika 5. prikazuje neobrađeni i obrađeni kutni zavar nakon HFMI obrade.

Prilikom obrade, materijal se lokalno plastično deformira što uzrokuje promjene u mikrostrukturi materijala i lokalnoj geometriji ruba zavora. Također se unose i tlačna zaostala naprezanja čime se smanjuju vlačna zaostala naprezanja što dodatno povećava otpornost na umor zavarenog priključka [29]. Zbog plastičnih deformacija (hladnog oblikovanja materijala), udarcima glave dolazi do očvršćivanja materijala što lokalno povećava granicu popuštanja i dodatno povećava otpornost ruba zavora na umor [30]. Interakcija spomenutih parametara poboljšanja još uvijek nije potpuno istražena te oni nisu prikladno i univerzalno



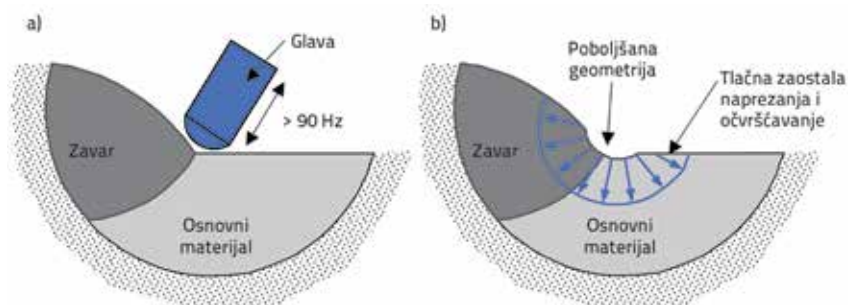


Slika 5. Neobrađeni (lijevo) i kutni zavar nakon HFMI obrade (desno) [12]

kvantificirani. HFMI postupci kod zavarenih priključaka znatno produljuju period nastanka pukotine (povećavanjem potrebnog broja ciklusa do nastanka pukotine), što se kod neobrađenih zavora zanemaruje [31]. Nakon što pukotina naraste izvan zone utjecaja HFMI obrade, preostalo vrijeme rasta pukotine slično je kao i kod neobrađenih priključaka [30]. Slika 6. prikazuje pozitivan učinak HFMI obrade na prijelazno područje metala zavora i zone utjecaja topline.

HFMI obrada je primjenjiva samo ako pukotina kod umora nastaje na rubu zavora. U slučaju nastanka pukotine u korijenu zavora, HFMI obrada nema učinka. Nakon obrade ruba zavora, postoji mogućnost promjene kritičnog načina otkazivanja zavarenog priključka u nastajanje pukotine u korijenu zavora ili iz defekata u osnovnom materijalu. Na taj način neće doći do željenog povećanja otpornosti na umor [32, 33]. Primjerice, u radu [34] ispitivani su HFMI obrađeni i neobrađeni zavareni priključci pokrovnih ploča (eng. *cover plate*). Uočeno je da u određenim slučajevima pukotina kod obrađenih zavarenih priključaka nastaje na mjestu korijena obrađenog zavora, a kod neobrađenih nastaje na rubu zavora. Zbog toga, kada se planira obrada zavora, potrebno je primjenjivati zavare kod kojih neće doći do stvaranja pukotine na mjestu korijena čiji se primjeri mogu pronaći u literaturi [12]. Ako se pak provodi obrada zavarenih priključaka koji su osjetljivi na ovu pojavu, treba ih provjeriti eksperimentalnim ili numeričkim analizama [12]. Smjernice za provedbu HFMI obrade, kontrolu kvalitete te procjenu poboljšanja otpornosti na umor pomoću nominalnih naprezanja, *hot spot* naprezanja te efektivnog naprezanja u zarezu *notch stress* dane su u [12].

Iako se HFMI obrada prije primjenjivala samo za popravke postojećih konstrukcija, danas je postala dio industrijskog procesa i za nove konstrukcije. S obzirom na sve veću komercijalnu primjenu, javlja se potreba za standardizacijom procesa HFMI obrade i metoda procjene otpornosti na umor [12, 35]. Osnova za



Slika 6. a) HFMI obrada; b) Parametri koji utječu na poboljšanje otpornosti na umor

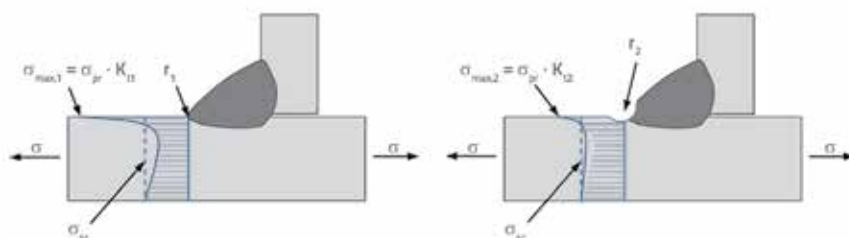
razvoj smjernica za procjenu umora kod HFMI obrađenih zavora jest bolje razumijevanje svih parametara i ograničenja koji utječu na stupanj poboljšanja otpornosti na umor. U sljedećem poglavlju opisani su parametri koji utječu na poboljšanje otpornosti na umor zavarenih priključaka obrađenih HFMI metodom.

3. Parametri koji utječu na poboljšanje otpornosti na umor kod HFMI metode

3.1. Promjena geometrije ruba zavora nakon obrade

Zavar predstavlja naglu promjenu u geometriji priključka, što uzrokuje visoke koncentracije naprezanja, kako je prikazano na slici 7. Koncentracija naprezanja se definira faktorom koncentracije naprezanja K_t . Najveća koncentracija je na rubu zavora koji zbog toga mjesto najvjerojatnijeg otkazivanja umorom. Što je radijus zarezata manji, koncentracija naprezanja je veća te je u konačnici životni vijek konstrukcijskog detalja kraći. HFMI postupci poboljšavaju geometriju tako što se povećava radijus ruba zavora, odnosno $r_2 > r_1$.

Povećanjem radijusa ruba zavora osigurava se "blaži" prelazak između lica zavora i ploče elementa i time se smanjuje koncentracija naprezanja i povećava otpornost na umor. Kako bi se dobila jednolika geometrija duž zavora, optimalna su tri prolaska HFMI uređajem preko ruba zavora [36]. Kod numeričkih proračuna neobrađenih zavora može se uzeti radijus ruba zavora



Slika 7. Koncentracija naprezanja na mjestu zavora prije i nakon HFMI obrade ($\sigma_{\max,1} > \sigma_{\max,2}$), gdje su K_{t1} i K_{t2} faktori koncentracije naprezanja, a r_1 i r_2 radijusi ruba zavora

u iznosu $r = 0,25$ mm [37, 38], a za modeliranje HFMI žlijeba uzima se radijus u iznosu od $r = 3,3$ mm (dubine 0,2 mm i 3,8 mm širine) [39]. Ove dimenzije su također i u rasponu dimenzija koje preporučuju smjernice za provedbu HFMI obrade [31].

3.2. Unos tlačnih naprezanja HFMI metodom

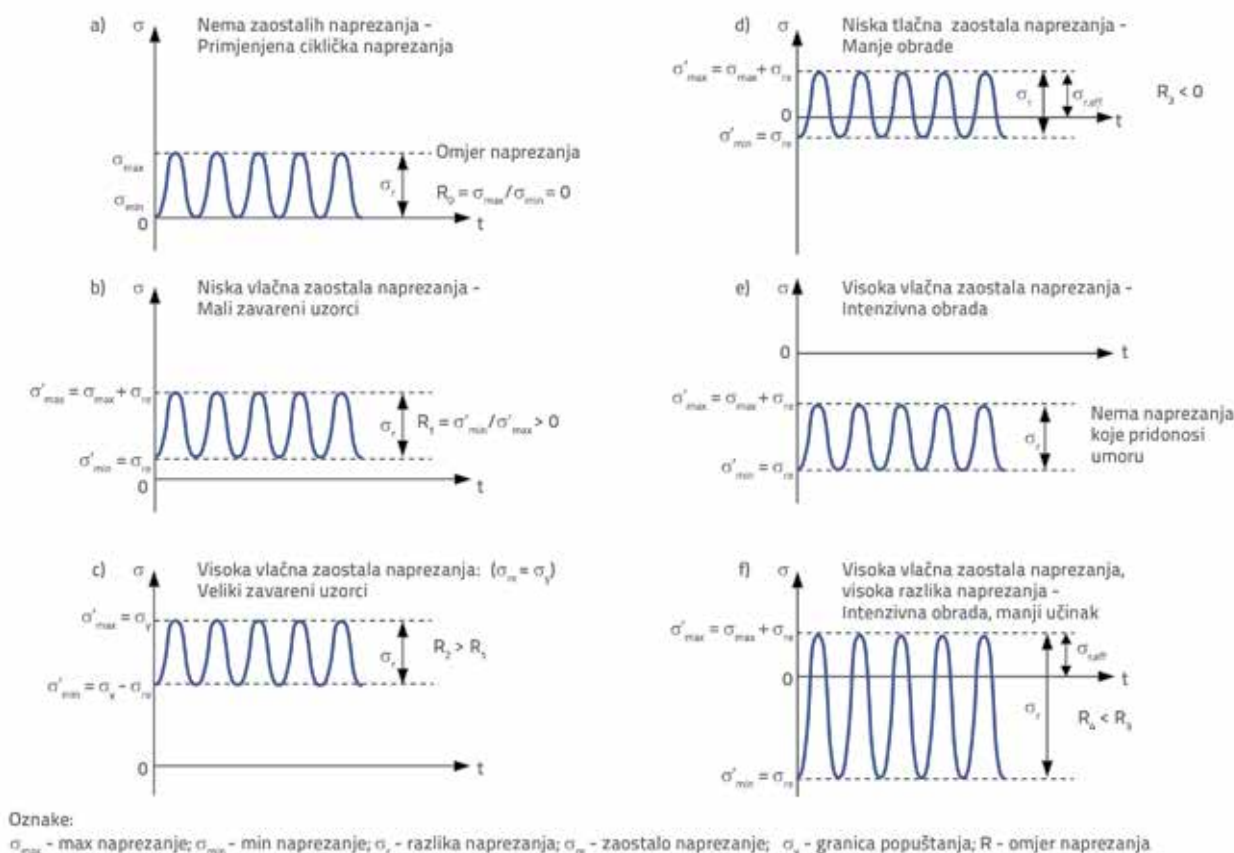
Zaostala naprezanja su samouravnotežujuća naprezanja koja su nastala unutar konstrukcijskog detalja zbog pojedinog prethodnog djelovanja poput zavarivanja ili hladnog oblikovanja te se zadržavaju unutar elementa i nakon prestanka tog djelovanja. U slučaju zavarivanja, u području ruba zavora se pojavljuju tlačna zaostala naprezanja kao posljedica lokalnog skupljanja materijala u okolini zavora nakon hlađenja. Ova pojava ima

negativan utjecaj s obzirom na nastanak pukotine kod umora te pridonosi krutom otkazivanju materijala. HFMI obradom se unose tlačna zaostala naprezanja koja se zbrajaju s nepovoljnim vlačnim naprezanjima na rubu zavora i tako ih umanjuju. Prema nekim autorima [40], ovo je najvažniji parametar poboljšanja kod HFMI obrade. Ukupno naprezanje u obrađenom zavarenom priključku iznosi:

$$\sigma_{uk} = \sigma_{vanjsko} + \sigma_{zaost,zavar} + \sigma_{zaost, HFMI} \quad (1)$$

Slika 8. prikazuje primjer različitih uvjeta naprezanja unutar zavarenog priključka. Omjer naprezanja R se definira kao omjer minimalnog i maksimalnog naprezanja i obično se razlikuje od omjera naprezanja koje je nastalo vanjskim opterećenjem.

Iz slike 8. se vidi kako visoka vlačna naprezanja pridonose umoru povećavajući maksimalno naprezanje. Kada je tlačno zaostalo naprezanje uneseno HFMI obradom, vlačno naprezanje nastalo zavarivanjem i vlačni dio naprezanja od vanjskog promjenjivog opterećenja se mogu eliminirati ili djelomično umanjiti. Slučaj (e) na slici prikazuje idealni učinak HFMI obrade. Pozitivan učinak HFMI obrade je izraženiji kada je amplituda naprezanja manja. Vlačna naprezanja u kombinaciji s vanjskim opterećenjem



Slika 8. Različiti uvjeti naprezanja unutar zavarenog priključka s obzirom na stanje zaostalih naprezanja [41]

mogu povećati vrijednost srednjeg naprezanja i učiniti da je komponenta izložena većem opterećenju nego što u stvarnosti djeluje na tu komponentu. Radi boljšeg razumijevanja stupnja poboljšanja zavora HFMI metodom, posljednjih su godina provedena brojna istraživanja o utjecaju HFMI metode na stanje zaostalih naprezanja unutar zavora [42-46].

HFMI obrada može unijeti i do 400 MPa pozitivnih tlačnih naprezanja, i to do 1,5 mm od površine materijala u dubinu [6]. Veličina unesenih zaostalih naprezanja se povećava povećanjem granice popuštanja materijala [6], što je povoljno kod čelika visoke čvrstoće. Zaostala naprezanja se zadržavaju u području obrađenog ruba zavora čak i nakon predopterećenja (poput stalnog opterećenja), a prije opterećenja umorom [47, 48]. Turski i suradnici [42] su pokazali da HFMI obrada u materijal unosi tlačna zaostala naprezanja do dubine od 2 mm, a Liu i suradnici [43] utvrdili su da tlačna naprezanja sežu čak i do 4 mm u dubinu. Rad [49] prikazuje eksperimentalne podatke da tlačna zaostala naprezanja sežu 1,5 - 2,0 mm dubine s maksimalnim vrijednostima na približno 0,4 mm do 0,5 mm ispod površine materijala. Nakon obrade, prosječni radijus zavora iznosi 1,5 mm do 2,0 mm s dubinom žlijeba od 0,1 mm do 0,2 mm. Dubina žlijeba je u bliskoj vezi s lokalnim zaostalim naprezanjima te je bitna mjera u kontroli kvalitete HFMI obrade [48, 50].

Najčešće korišten alat za procjenu zaostalih naprezanja je metoda konačnih elemenata te su odnedavno razvijani brojni numerički modeli [42-45, 51]. Utjecaj tipa mreže konačnih elemenata, karakteristika materijala, rubnih uvjeta, veličina glave, načina modeliranja i pravila očvršćivanja na dobivene rezultate u numeričkim proračunima mogu se pronaći u [44, 52, 53]. Simulacije zaostalih naprezanja se eksperimentalno potvrđuju različitim mjernim metodama poput rendgenske difrakcije i neutronske difrakcije [41].

Zaostala naprezanja unesena HFMI obradom se mogu djelomično ili potpuno relaksirati zbog pojedinačnih skokova u naprezanju kao dio uporabnih opterećenja (predopterećenja) [54-58], što utječe na smanjenje životnog vijeka zavarenog priključka kod umora. Predopterećenja opušaju zaostala naprezanja proporcionalno njihovoj magnitudi [56]. Na primjer, statičko opterećenje veličine od otprilike 40 % nominalne granice popuštanja čelika smanjuje pozitivna tlačna zaostala naprezanja unesena *Hammer Peening* metodom, koja ima sličan učinak kao HFMI obrada [29].

Stabilnost i opuštanje zaostalih naprezanja kod HFMI obrade priključaka ovise o faktorima poput omjera naprezanja i predopterećenja, početne vrijednosti zaostalih naprezanja, lokalne koncentracije naprezanja te lokalne granice popuštanja [59]. Pozitivan učinak kod metoda modifikacije zaostalih naprezanja smanjuje se i povećanjem srednjeg naprezanja [54], jer se tako povećava i lokalno srednje naprezanje na rubu zavora koje umanjuje pozitivan učinak tlačnih zaostalih naprezanja.

Opuštanje zaostalih naprezanja uglavnom nastaje kod čelika niske čvrstoće opterećenih visokim vlačnim naprezanjem [30, 60]. Kod čelika visoke čvrstoće uglavnom nema pojave opuštanja zaostalih naprezanja, već ona ostaju stabilna tijekom cijelog

životnog vijeka. Kako je već spomenuto, ukupno poboljšanje zavora HFMI postupcima očituje se kroz unos tlačnih zaostalih naprezanja, promjenu geometrije te lokalno povećanje tvrdoće. Čak i kada nastupi opuštanje zaostalih naprezanja, poboljšanje otpornosti na umor i dalje postoji zbog preostala dva parametra, ali je u takvim slučajevima potrebno detaljnije istražiti stupanj poboljšanja otpornosti.

3.3. Povećanje tvrdoće materijala na mjestu obrade zavora

HFMI obrada zbog plastičnih deformacija u području obrade (hladnog oblikovanja materijala) povećava tvrdoću površine materijala u obrađenom području [61], što za posljedicu ima i lokalno povećanje granice popuštanja [62]. Na taj način se povećava i otpornost zavarenog priključka na umor [30]. Povećanje tvrdoće materijala može iznositi i do 100 % u odnosu na neobrađeno stanje [29, 63]. Dubina očvršćivanja materijala u većini slučajeva iznosi manje od 1 mm. Prema [47], povećanje tvrdoće seže od 0,3 do 0,5 mm u dubinu. Povećanje tvrdoće ovisi o kvaliteti čelika pa je kod većih čvrstoća čelika manji potencijal povećanja tvrdoće [47, 49]. Weich i suradnici [17] primijenili su HFMI obradu za čelike tlačne čvrstoće 434 MPa i 719 MPa. Kada se uspoređuju tvrdoće u neobrađenom i obrađenom stanju, primjećuje se povećanje u tvrdoći otprilike od 66 % za čelike niže čvrstoće i povećanje otprilike od 28 % za čelike više čvrstoće. Kod čelika niže tvrdoće primjećuje se dubina povećanja tvrdoće od približno 0,3-0,4 mm, a kod čelika visoke čvrstoće primijećena je dubina od 0,3 mm. Iako je povećanje tvrdoće kod hladnog oblikovanja čelika poznat fenomen, ne postoji sustavna kvantifikacija ovog utjecaja za HFMI obrađene priključke [30].

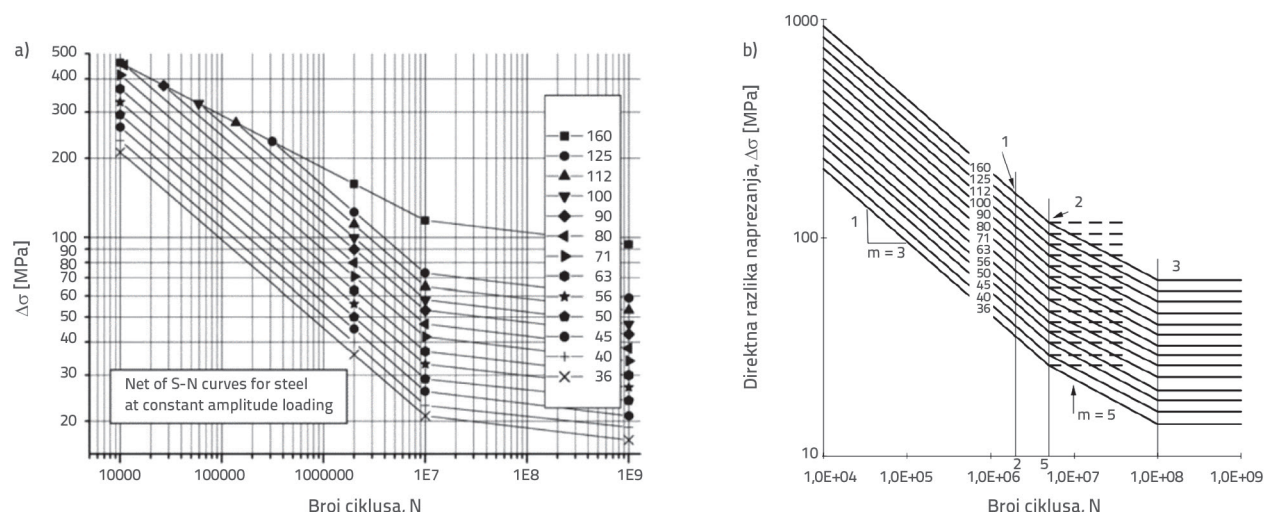
4. Procjena umora zavarenih priključaka obrađenih HFMI metodom

4.1. S-N pristup temeljen na nominalnim naprezanjima

4.1.1. Općenito

Procjena umora zavarenih priključaka se najčešće temelji na S-N metodi, što se često predlaže i u normama [7, 8]. Pojedini priključak se svrstava u kategoriju s pripadajućom eksperimentalno dobivenom S-N krivuljom, koja predstavlja otpornost priključka na umor. Krivulje otpornosti prikazuju omjere amplituda promjenjivih naprezanja i broja promjena tih amplituda do otkazivanja priključka. Tipične krivulje za neobrađene zavarene priključke prema EN 1993-1-9 i IIW normama prikazane su na slici 9.

Svaka od krivulja otpornosti se identificira karakterističnom čvrstoćom (razlikom naprezanja) kod umora pri $N = 2 \cdot 10^6$ promjena naprezanja, izraženom u MPa. Ta vrijednost označava kategoriju detalja. S-N krivulje koje predlaže Eurokod [8] za neobrađene priključake imaju nagib $m = 3$ do naprezanja koje se



Slika 9. Krivulje otpornosti (S-N krivulje) neobrađenih zavarenih priključaka prema IIW (lijevo) i EC (desno) [7, 8]

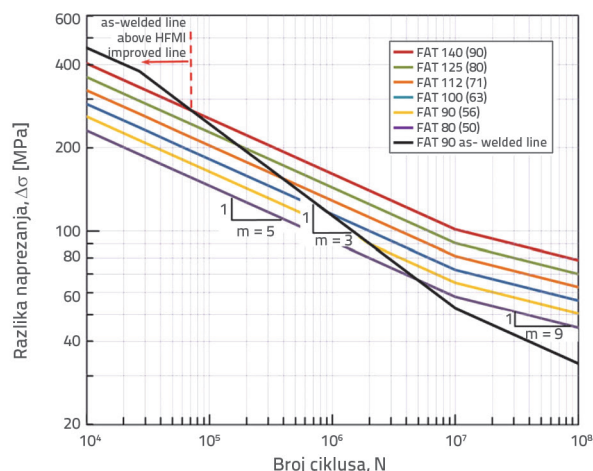
naziva granica umora pri konstantnim amplitudama, gdje nagib prelazi u $m = 5$. Ova točka odgovara razlikama naprezanja pri $5 \cdot 10^6$ broja promjena naprezanja.

Procjena životnog vijeka kod umora se svodi na svrstavanje priključaka u određenu kategoriju detalja koja predstavlja otpornost te određivanje amplitude naprezanja na promatranom mjestu. Najčešći pristup za određivanje djelovanja umora u S-N metodi jest pristup na temelju nominalnih naprezanja, koji se bazira na prosječnom naprezanju u promatranom poprečnom presjeku. Naprezanje se izračunava pomoću klasične mehanike konstrukcija pod pretpostavkom linearnoelastične teorije. Pri tome se zanemaruju lokalni utjecaji koji uzrokuju povećanje (koncentraciju) naprezanja. Lokalni utjecaji se indirektno uzimaju u obzir pomoću S-N krivulja. U ovom se poglavlju prikazuje procjena temeljena na nominalnim naprezanjima, a ostali pristupi prikazuju se u sljedećim poglavljima.

Krivulje otpornosti kod HFMI obrađenih zavora [23, 47, 64, 65] bazirane su na pretpostavljenom nagibu S-N krivulje od $m = 5$, a kategorija detalja kod umora je također definirana za $N = 2 \cdot 10^6$ broja promjena naprezanja [12, 22]. Procjena životnog vijeka HFMI obrađenih priključaka prema IIW smjernicama [12] obuhvaća kategorije detalja od FAT50 do FAT90. Ovo ograničenje je zbog činjenice da se više kategorije detalja odnose na nezavarene priključke ili priključke s već obrađenim zavarima [66]. Priključci niže kategorije od FAT50 nisu razmatrani jer kod takvih priključaka postoji i velik rizik od otkazivanja preko korijena zavora, gdje HFMI nema utjecaja. S-N krivulje za HFMI obrađene priključke prikazane su na slici 10.

Maksimalna kategorija detalja koja se potencijalno može postići obradom zavora je po iznosu najbliža kategoriji koja se dobije kada bi se vrijednost nepoboljšane kategorije pomnožila s faktorom 1,6 [12]. Da bi se olakšao proračun, to odgovara poboljšanju od četiri kategorije umora. Na primjer, ako se priključak kategorije FAT71 obradi HFMI postupkom, njegova nova vrijednost iznosi FAT112. Na slici 10. je takva S-N krivulja označena kao 112 (71). Ako se na slici 10. promatra priključak

kategorije FAT90, vidi se da se krivulja neobrađenih zavora s nagibom $m = 3$ te krivulja zavora poboljšanog HFMI obradom sijeku u točki oko $N = 72.000$ ciklusa. To znači da za zavarene konstrukcije od čelika niže kvalitete neće biti znatno poboljšanje otpornosti na umor HFMI obradom za životni vijek manji od 72.000 ciklusa.



Slika 10. Karakteristične nominalne S-N krivulje za HFMI obrađene zavarene priključke za čelike niže kvalitete ($f_y < 355$ MPa) za $R \leq 0,15$. Vrijednost u zagradi predstavlja kategoriju detalja FAT za neobrađene priključke prema Hobbacheru [7, 12]

4.1.2. Utjecaj debljine ploče

Još od 1950-ih je poznato da otpornost na umor ovisi o debljini elementa te da se smanjuje povećanjem debljine [67]. Kod debljih ploča, veći volumen materijala je izložen visokim naprezanjima te je otpornost na umor ovakvih priključaka manja. Uz to, povećanje debljine ploče (uz zadržavanje lokalne geometrije ruba zavora) također stvara i veće koncentracije naprezanja na rubu zavora zbog manjeg omjera radijusa zarez a i debljine ploče [68, 69]. Više

o utjecaju debljine elemenata na otpornost kod umora može se pronaći u [68, 70]. Činjenica je i da su zaostala naprezanja kao posljedica zavarivanja veća kod debljih elemenata.

Iako je utjecaj debljine elementa na životni vijek kod umora zavarenih priključaka poznat i pokriven različitim normama, taj utjecaj nije sustavno istražen za HFMI obrađenih priključaka postupcima [67]. Smjernice za procjene HFMI obrađenih priključaka primjenjuju se za debljine ploča od 5 do 50 mm [12]. Debljina ploča i zavara utječu na lokalnu koncentraciju naprezanja na rubu zavara te gradijente naprezanja kroz debljinu ploče. Zbog toga procjene preko nominalnih i *hot spot* naprezanja, o kojima će biti riječi kasnije u ovom radu, zahtijevaju primjenu faktora redukcije za sve ploče deblje od 25 mm [7].

4.1.3. Utjecaj kvalitete čelika

Kako je prije spomenuto, otpornost neobrađenih zavarenih priključaka kod umora ne ovisi o kvaliteti materijala elemenata koji se spajaju. Međutim, postoje brojne studije koje pokazuju da se stupanj poboljšanja zavara HFMI postupcima povećava s čvrstoćom materijala [6, 23]. U radu [71] potvrđeno je da HFMI obrada uz unošenje povoljnih tlačnih naprezanja do dubine od 1 mm i unošenjem radijusa ruba zavara od 2 mm ima najveći učinak kod čelika visoke čvrstoće. U radu [72] je pokazano da ako se uzme granica popuštanja $f_v = 355$ MPa kao referentna, za svako povećanje čvrstoće čelika od 200 MPa povećanje u otpornosti na umor iznosi otprilike 12,5 %. Ovo se može objasniti na način da su tlačna zaostala naprezanja unesena obradom proporcionalna granici popuštanja [30].

U smjernicama [67] za svako povećanje granice popuštanja od 200 MPa predlaže se povećanje jedne FAT kategorije [72], što se pokazalo kao konzervativna pretpostavka. Preporuke za dimenzioniranje uključuju povećanje od četiri FAT kategorije za priključke od čelika $f_v < 355$ MPa s obzirom na krivulje za nominalna naprezanja kod neobrađenog stanja. Povećanje za dodatnu kategoriju se provodi za svako povećanje granice popuštanja čelika od 200 MPa. Specifično povećanje kategorije se definira za $N = 2 \cdot 10^6$ ciklusa i pretpostavlja S-N nagib od $m = 5$ za HFMI obrađene priključke i $m = 3$ za neobrađeno stanje. Dopušteno povećanje u broju FAT kategorija kao funkciju granice popuštanja može se pronaći u [12].

Karakteristične S-N krivulje za HFMI obrađene priključke za čelike $f_v > 355$ MPa mogu se pronaći u [67]. Zavareni priključak od čelika visoke čvrstoće kao npr. FAT 80 ($m = 3$) u neobrađenom stanju bi bio FAT 180 ($m = 5$) ako je HFMI obrađen. FAT 90 bi kao obrađen imao istu kategoriju od FAT 180. Ovo ograničenje je zbog trenutnog nedostatka eksperimentalnih podataka te je najviša kategorija u koji se priključak može poboljšati 180.

4.1.4. Utjecaj opterećenja i omjera naprezanja

Za procjenu umora neobrađenih priključaka, IIW smjernice ograničavaju maksimalne vrijednosti nominalne razlike naprezanja na $1,5 f_v$ [7], a *hot spot* naprezanja se ograničavaju na

$2 f_v$ [12]. Kod obrađenih zavarenih priključaka, ograničenje omjera naprezanja iznosi $R \leq 0,5$ te maksimalnog naprezanja $\sigma_{\max} \leq 0,8 f_v$ [14]. Ta ograničenja se primjenjuju zbog mogućih nestabilnosti zaostalih naprezanja ako bi se premašile dopuštene vrijednosti ograničenja. U literaturi postoje ispitivanja obrađenih zavarenih priključaka na umor s promjenjivim amplitudama i nominalnim preopterećenjima od $0,9 f_v$, $1,0 f_v$ i $1,1 f_v$ gdje je potvrđeno da se učinak HFMI obrade smanjuje [32].

HFMI obrađeni priključci mogu imati do 8 FAT kategorija poboljšanja ovisno o čvrstoći materijala, geometriji zavarenog priključka itd. Utjecaj omjera naprezanja se izražava kao ograničenje u maksimalno dopuštenom povećanju broja FAT kategorija [12]. Ograničenje maksimalne konstantne amplitude naprezanja $\Delta\sigma$ može se primijeniti na zavar kako bi se osigurao pozitivan učinak HFMI obrade [12].

4.1.5. Naprezanja s promjenjivim amplitudama

S-N krivulje se baziraju na podacima ispitivanja dobivenim uglavnom pri konstantnim amplitudama, dok su u stvarnosti priključci izloženi naprezanjima s promjenjivim amplitudama. U takvim se situacijama zapis naprezanja pretvara u zapis s konstantnim amplitudama na temelju metoda prebrojavanja razlika naprezanja poput metode kišnog toka ili metode spremnika [73]. Na taj način se dobiva niz razlika naprezanja konstantnih amplituda s pripadajućim brojem ponavljanja. Ukupni životni vijek se tada računa pomoću Palmgren-Minerovog pravila [74], iako u slučaju HFMI obrađenih priključaka Minerova suma može dati netočne rezultate [32]. Osnovni parametri koji utječu na ponašanje HFMI obrađene konstrukcije kod umora jesu periodičnost pojavljivanja preopterećenja, raspored ciklusa opterećenja u spektru opterećenja te maksimalne i minimalne razine naprezanja. Za određivanje životnog vijeka priključaka koristi se ekvivalentna razlika naprezanja prema izrazu (2).

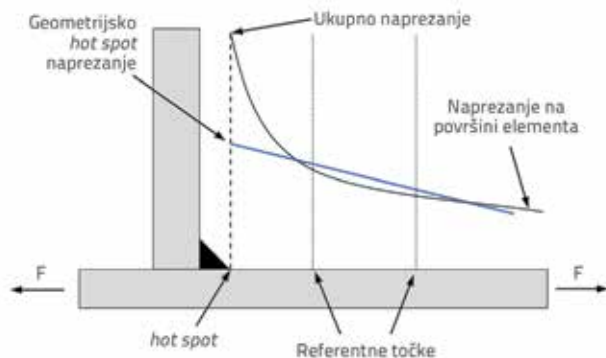
$$\Delta\sigma_{eq} = \left(\frac{1}{D} \cdot \frac{\sum \Delta\sigma_i^m N_i + \sigma_k^{(m-m')} \cdot \sum \Delta\sigma_j^{m'} N_j}{\sum N_i + \sum N_j} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

U izrazu (2) $\Delta\sigma_k$ je razlika naprezanja povezana s granicom proračunom na $N = 1 \cdot 10^7$, N_i je broj ciklusa naprezanja $\Delta\sigma_i$ gdje je $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_k$, N_j je broj ciklusa naprezanja $\Delta\sigma_j$ gdje je $\Delta\sigma_j < \Delta\sigma_k$, m je nagib S-N krivulje iznad točke promjene nagiba, $m' = 2m - 1$ je nagib krivulje ispod točke promjene nagiba i D je suma oštećenja, odnosno $D = 0,5$. Yldrim i Marquis [39] pokazuju da se izraz (2) može primijenjivati za korelaciju promjenjivih naprezanja konstantnih i promjenjivih amplituda za HFMI obrađene zavare. U slučaju HFMI obrađenih zavara, značajni udio u poboljšanju čvrstoće kod umora se odnosi na povoljna tlačna naprezanja. Stoga svaka promjena u zaostalim naprezanjima tijekom opterećivanja priključka promjenjivim amplitudama može imati značajan utjecaj na čvrstoću kod umora. Za HFMI obrađene priključke od čelika visoke čvrstoće zabilježene su promjene načina otkazivanja s obzirom na to je li opterećenje umorom

konstantnih ili promjenjivih amplituda [75]. Promjenjive amplitude koriste zapis naprezanja koji sadrži pojedine cikluse s velikim rasponima naprezanja što dovodi do otkazivanja u žlijebu nastalom HFMI obradom, a opterećenje s konstantnim amplitudama rezultira otkazivanjem na drugim mjestima. U radu [76] su uspoređivani rezultati ispitivanja s konstantnim amplitudama ($R = 0,5$ do $0,7$) te ograničenim promjenjivim amplitudama s predloženim IIW smjernicama [14]. Potvrđeno je da nagibi S-N krivulja variraju u rasponu od 4,4 do 9,6. Zaključeno je da je blaži nagib prikladniji za dimenzioniranje obrađenih rubova zavora izloženih umoru za srednji i visoko ciklični umor (10^4 do 10^7 ciklusa).

4.2. S-N pristup temeljen na *hot spot* naprezanjima

Hot spot naprezanja su geometrijska naprezanja dobivena ekstrapolacijom naprezanja iz referentnih točaka na određenoj udaljenosti od ruba zavora, kako prikazuje slika 11 [3]. Ekstrapolacija se provodi kako bi se iz proračuna isključila nelinearna komponenta naprezanja koja se u obzir uzima indirektno preko S-N krivulja, a ekstrapolacija se provodi iz područja gdje je raspodjela naprezanja još uvijek linearna. Ovo područje za pločaste elemente počinje otprilike na udaljenosti $0,4t$ od ruba zavora, gdje je t debljina ploče. Preporuke za određivanje referentnih točaka i ekstrapolaciju se mogu pronaći u [77].



Slika 11. Definicija *hot spot* naprezanja prema [78]

Za procjenu umora temeljenu na geometrijskom *hot spot* naprezanju preporučuje se postupak predložen u [77]. Kao i u slučaju nominalnih naprezanja, karakteristične krivulje HFMI obrađenih zavarenih priključaka su definirane za $N = 2 \cdot 10^6$, a bazirane su na pretpostavljenom nagibu od $m = 5$ u području $10^4 \leq N < 10^7$ i $m' = 9$ za $10^7 \leq N$. U kontekstu pristupa preko nominalnih naprezanja kod procjene umora HFMI obrađenih priključaka, već je spomenuto da najviše dopuštena S-N krivulja odgovara kategoriji FAT180. Problem koji se javlja kod *hot spot* proračuna jest kod zavarenih priključaka s relativno malim koncentracijama naprezanja gdje se može postići veoma visoka kategorija detalja, a u smjernicama se ona ograničava na FAT180.

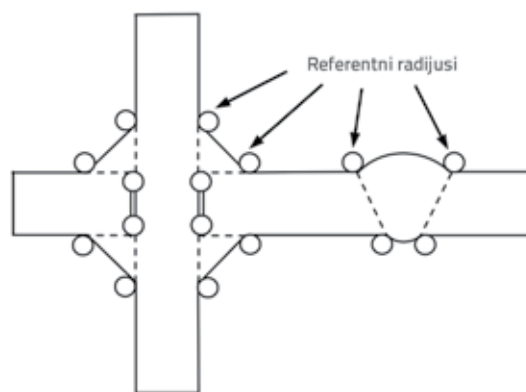
Koncentracija naprezanja u *hot spot* metodi definira se kao omjer geometrijskog σ_s i nominalnog naprezanja σ_{nom} prema izrazu (3):

$$K_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_{nom}} \quad (3)$$

Kao i kod nominalnih naprezanja, potrebno je primijeniti faktor redukcije razreda čvrstoće kod umora zbog debljine te smjernice za promjenjive amplitude zajedno s *hot spot* pristupom. Primjeri proračuna životnog vijeka kod umora obrađenih zavarenih priključaka pomoću "hot spot" pristupa mogu se pronaći u [79, 80].

4.3. S-N pristup temeljen na efektivnom *notch* naprezanju

Ovaj je pristup danas sve više zastupljen u industriji, a smjernice za procjene umora tim pristupom mogu se pronaći i u normama [81, 82]. Osnovni je koncept ovog pristupa numeričko modeliranje korijena ili ruba zavora sa zarezima određenog referentnog radijusa, slika 12. Efektivno naprezanje u zarezu je ukupno naprezanje u korijenu zavora dobiveno proračunom pod pretpostavkom linearno elastičnog ponašanja materijala [3].



Slika 12. Proračun *notch* naprezanja s referentnim radijusima [3]

U procjenama umora pristupom koji se temelji na naprezanju u zarezu postoje dva najčešće korištena zamišljena radijusa u iznosu od 1 mm i 0,05 mm [81, 83]. Svaki zarez u korijenu ili rubu zavora modelira se bez diskontinuiteta, uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja materijala. Referentni radijus od 1 mm koristi se za ploče deblje od 5 mm pa ova metoda nalazi primjenu i u građevinskoj struci. Procjena umora bazirana na naprezanju u zarezu slijedi isti postupak kao i pristup preko nominalnih naprezanja, samo što se umjesto globalnog naprezanja razmatra lokalno efektivno naprezanje u zarezu. Procedura procjene bazira se na usporedbi efektivne amplitude naprezanja kod umora s odgovarajućom S-N krivuljom koja predstavlja otpornost. Takve se krivulje predlažu u preporukama IIW-a [83] za pločaste konstrukcije opterećene uzdužnim silama i momentima savijanja. Godine 2008. IIW je odobrio smjernice za procjenu umora obrađenih priključaka pomoću "notch" naprezanja [84]. Prijedlog proračuna se temelji na analizi naprezanja koristeći

zamišljeni radijus zarezu $\rho_f = 1 \text{ mm}$ te na proceduri koju je opisao Fricke [83]. Nagib S-N krivulja HFMI obrađenih zavarenih priključaka isti je kao i kod *hot spot* naprezanja. Kao i kod metode nominalnih naprezanja, karakteristične krivulje su definirane za $N = 2 \cdot 10^6$. Za HFMI obrađene zavare, odgovarajuće S-N krivulje su dane u [12], za različite razrede čvrstoće čelika. Također se primjenjuje ograničenje gdje poboljšana kategorija detalja može biti maksimalno FAT 180.

Fricke [83] definira efektivnu *notch* koncentraciju naprezanja kao omjer efektivnog *notch* naprezanja σ_w i geometrijskog naprezanja σ_s prema sljedećem izrazu:

$$K_w = \frac{\sigma_w}{\sigma_s} \quad (4)$$

Fricke [12] također predlaže da minimalni K_w bude najmanje 1,6 za priključke s malom koncentracijom naprezanja, čak i ako se proračunom dobije manji faktor. Dodatni zahtjevi za HFMI obrađene priključke nisu potrebni jer je K_w definiran s obzirom na geometrijsko naprezanje σ_s , gdje se već primjenjuju određena ograničenja i zahtjevi. Preporuke čvrstoće kod umora dane u [12] temelje se na pretpostavci da je $\Delta\sigma$ izračunana u smislu maksimalnog glavnog naprezanja u zrezu. Kao kod nominalnih naprezanja, potrebna je redukcija FAT kategorija s obzirom na omjer naprezanja te prema smjernicama za promjenjive amplitude. Budući da je ova metoda izrazito lokalnog karaktera, nije potrebna redukcija zbog debljine elementa [12].

Nominalna i *hot spot* naprezanja ne uzimaju u obzir lokalne utjecaje HFMI-a, već uključuju samo globalne utjecaje geometrije [30]. U radu [85] je provedena analiza uzimajući u obzir lokalno poboljšanje ruba zavaru pomoću metode *notch* naprezanja, ali je zaključeno da se zbog pojednostavljenja analize HFMI žlijeb može zanemariti.

4.4. Model "nastanak-širenje pukotine"

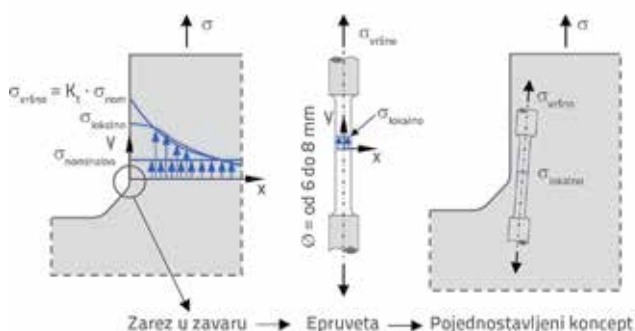
4.4.1. Općenito

Prikazat će se nekonvencionalna metoda procjene umora koja se temelji na kombinaciji modela nastanka i širenja pukotine, a moguće ju je primijeniti za procjenu umora obrađenih zavarenih priključaka HFMI metodom [86]. Nastanak pukotine se modelira "notch strain" pristupom, gdje se definira broj promjena naprezanja određene amplitude do nastanka pukotine određene veličine. Širenje nastale pukotine se modelira mehanikom loma, koja daje potreban broj promjena naprezanja za širenje pukotine do kritične vrijednosti kada nastupa otkazivanje. Iako ovaj pristup nije usvojen u normama, pomoću njega je moguće učinkovito procijeniti životni vijek obrađenih i neobrađenih zavarenih čeličnih priključaka kod umora [3, 86]. Sam proces umora se sastoji od perioda nastanka i perioda širenja pukotine, pa je prikladno ove dvije faze razmatrati odvojeno. S-N metoda ne razlikuje ove dvije faze, već promatra ukupni životni vijek. Budući da se HFMI obrada odnosi samo na period nastanka pukotine, pomoću *notch strain* pristupa je moguće procijeniti

produljenje perioda nastanka pukotine. Na taj se način u obzir može uzeti promjena geometrije, tlačna zaostala naprezanja te povećanje tvrdoće.

4.4.2. Model nastanka pukotine - *notch strain*

Notch strain pristup su predložili Seeger i suradnici [87]. Procjena otpornosti se sastoji od određivanja naprezanja i deformacija na rubu zavaru u elasto-plastičnim uvjetima te uspoređivanje sa S-N krivuljom deformacije materijala uzorka ($\varnothing = 6-8 \text{ mm}$) do njegovog potpunog otkazivanja (slika 13.). Uvod u *notch strain* pristup se može pronaći u [88].



Slika 13. Koncept sličnosti za *notch strain* pristup

Naprezanja i deformacije na rubu zavaru unutar zavarenog priključka izračunavaju se iz krivulje naprezanje-deformacija te Neuberovim izrazom iz [89]. Pri tome se u obzir uzimaju i zaostala naprezanja unesena HFMI obradom. Naprezanja i deformacije na rubu zavaru se mogu dobiti i pomoću faktora koncentracije naprezanja u zrezu K_t . *Notch* faktor kod umora se izvodi iz faktora koncentracije naprezanja prema Petersonu [90, 91]. Vrijednost *notch* faktora kod umora se smanjuje u odnosu na vrijednost faktora koncentracije naprezanja, naročito za oštre zrezove. Za konzervativniji proračun se uzima faktor koncentracije naprezanja, preko kojega je moguće u obzir uzeti promjenu geometrije nakon HFMI obrade ruba zavaru. Naprezanja i deformacije u zrezu zavaru u elasto-plastičnom stanju prema Neuberu su dani kao:

$$\sigma_k \varepsilon_k = \sigma_n \varepsilon_n K_t^2 = \frac{(\sigma_n K_t)^2}{E} \quad (5)$$

$$K_{te} K_{ts} = K_t^2 \quad (6)$$

gdje je K_t elastični faktor koncentracije naprezanja, K_{te} elasto-plastični faktor koncentracije naprezanja, K_{ts} elasto-plastični faktor koncentracije deformacija, σ_k maksimalno naprezanje u zrezu, ε_k maksimalna deformacija u zrezu, σ_n nominalno naprezanje, ε_n nominalna deformacija ($\varepsilon_n = \sigma_n/E$).

Proračun naprezanja i deformacija u zrezu se bazira na stabiliziranoj cikličkoj krivulji naprezanje-deformacija. Lokalna naprezanja i deformacije slijede cikličku krivulju naprezanje-

deformacija koja se aproksimira Ramberg-Osgoodovim izrazom (7), prema [92]:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{1/n'} \quad (7)$$

gdje je ε_a ukupna amplituda deformacija, $\varepsilon_{a,el}$ elastična amplituda deformacija, $\varepsilon_{a,pl}$ plastična amplituda deformacija, σ_a amplituda naprezanja, E modul elastičnosti, K' ciklički koeficijent očvršćivanja deformacija, n' ciklički eksponent očvršćivanja deformacija.

Ciklička krivulja naprezanje - deformacija tvori histereznu petlju u dijagramu naprezanje-deformacija. Dijelovi krivulje su aproksimirani udvostručujući trenutačne amplitude primarnih cikličkih krivulja naprezanje-deformacija. Grane krivulje histerezne petlje, koje se podižu ili spuštaju iz točaka uključuju Bauschingerov efekt [93] te su opisane dvostrukom krivuljom naprezanje - deformacija [94] kao:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (8)$$

Otkazivanje, odnosno nastanak pukotine je opisan sa S-N krivuljom deformacija, koja obuhvaća njihov elastični i plastični dio. Krivulja prema Mansonu i Coffinu, zajedno s korekcijskim učinkom srednjeg naprezanja prema Morrowu [95-97] glasi:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c \quad (9)$$

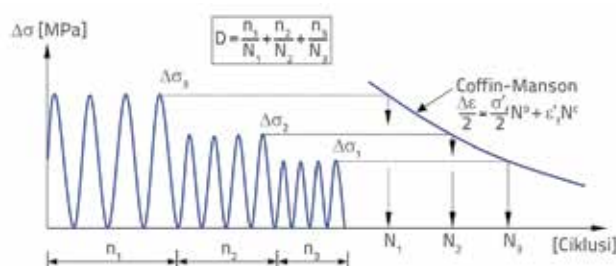
gdje je σ_f' koeficijent čvrstoće na umor, ε_f' koeficijent duktilnosti umora, b eksponent čvrstoće kod umora, c eksponent duktilnosti kod umora, σ_m srednje naprezanje, $2N$ broj ciklusa do nastanka pukotine. Period nastanka pukotine završava kada je veličina pukotine $a_i = 0,5 - 0,8$ mm [98].

Kod naprezanja s promjenjivim amplitudama, za procjenu životnog vijeka, Rainflow metodom [73] iz spektra naprezanja određuju se nominalne razlike naprezanja $\Delta \sigma_{nom,1}$, $\Delta \sigma_{nom,2}$, $\Delta \sigma_{nom,i}$ itd. Nakon toga se iz navedenih sustava jednadžbi određuju lokalne razlike naprezanja $\Delta \sigma_{local,1}$, $\Delta \sigma_{local,2}$, $\Delta \sigma_{local,3}$ itd. Vrijeme do nastanka pukotine se procjenjuje Minerovim pravilom tako da se za svaku pojedinu amplitudu naprezanja promatra njezin doprinos ukupnom oštećenju, slika 14. Nastanak pukotine se pojavljuje kada zbroj svih doprinosa oštećenju dosegne 1,0. Coffin-Mansonova jednadžba se koristi kao ukupni maksimalni broj promjena svake pojedine razlike naprezanja do otkazivanja:

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 1 \quad (10)$$

Primjena *local strain* pristupa zahtijeva definiranje materijalnih parametara koji se određuju ispitivanjima. Postoji više metoda za određivanje materijalnih parametara [99], poput metoda *Uniform material law* i *Hardness method*. Pomoću tih metoda

moгу se odrediti parametri za *notch strain* pristup i tako precizno procijeniti životni vijek zavarenog priključka kod umora, što je potvrđeno i eksperimentalnim rezultatima [99]. *Uniform material Law* su predložili Bäumel i Seeger [100]. Za procjenu parametara su potrebni samo modul elastičnosti i vlačna čvrstoća čelika. Druga spomenuta metoda u ovom radu je *Hardness method*. Ona je bitna za HFMI obradu jer uzima u obzir tvrdoću materijala. Predložili su je Roessle i Fatemi [101]. Pojedini parametri se procjenjuju iz Brinellove tvrdoće koja mora biti između 150 HB i 700 HB. Za procjenu parametara ovom metodom potrebni su Brinellova tvrdoća i modul elastičnosti čelika.



Slika 14. Ukupna oštećenja za period nastanka pukotine

4.4.3. Model širenja pukotine - mehanika loma

Period širenja pukotine se modelira mehanikom loma. Ovaj se pristup temelji na brojnim pretpostavkama s određenim stupnjem neizvjesnosti, te se može primijeniti za procjenu perioda širenja pukotine ako se koristi uz pomoć kalibracije modela [3]. Kalibracija znači da se model najprije prilagodi određenoj S-N krivulji, a zatim se ekstrapolira na traženi priključak. Kako bi se što preciznije procijenio životni vijek priključka, potrebno je točno odrediti početnu i konačnu veličinu pukotine, parametre širenja pukotine te S-N krivulju koja opisuje priključak. Stupanj prirasta pukotine je proporcionalan razlici naprezanja, što je izraženo faktorom intenziteta razlike naprezanja. Njime se opisuje stanje naprezanja u blizini vrha pukotine uzrokovano vanjskim opterećenjem, a izražava se kao:

$$\Delta K = Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (11)$$

gdje je Y faktor korekcije ovisan o geometriji pukotine, a je veličina pukotine i $\Delta \sigma$ je razlika naprezanja. Širenje pukotine uslijed umora nastaje ako faktor intenziteta naprezanja prelazi kritični faktor intenziteta naprezanja, a više o tome u [3].

Za procjenu perioda širenja pukotine kod zavarenih priključaka izloženih umoru s konstantnim amplitudama koristi se Paris-Erdoganova jednadžba koja aproksimira cikličku stopu rasta pukotina pod ravninskim uvjetima deformacija u vrhu pukotine. Pri tome se pretpostavlja širenje pukotine okomito na smjer djelovanja opterećenja. Parisova jednadžba glasi:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (12)$$

gdje je a veličina pukotine, N broj promjena ciklusa opterećenja, C i m eksperimentalno određene konstante materijala, a ΔK – faktor intenziteta naprezanja. Parametri materijala m i C ovise o mikrostrukturi materijala, srednjem naprezanju, uvjetima okoliša, temperaturi, stupnju korozije itd. Vrijednosti ovih konstanti, kao i popis literature gdje se one mogu pronaći, prikupljeni su u [3]. Slika 15. prikazuje tipičnu krivulju širenja pukotine prema Parisovom zakonu.

Proces širenja se sastoji od sporog širenja, stabilnog te nestabilnog širenja pukotine nakon čega nastupa otkazivanje. Parisova jednadžba se odnosi na područje linearnog stabilnog širenja pukotine. Životni vijek se procjenjuje integracijom Parisove jednadžbe:

$$N_{i,j} = \int_{a_i}^{a_j} dN = \int_{a_i}^{a_j} \frac{1}{D \cdot \Delta K^n} \cdot da \quad (13)$$

gdje je N broj promjena naprezanja od a_0 do a_c . Prilikom procjene širenja pukotine pomoću ove metode, veliku ulogu u određivanju perioda širenja pukotine ima procjena početne veličine pukotine a_i . Obično su veličine početne pukotine vrijednosti u granicama od $a_i = 0,01$ mm do $0,05$ mm [102] ili čak $0,15$ mm, kako preporučuje IIW [7]. Te veličine pukotina približne su mikrostrukturnim svojstvima materijala. Obično je kod čelika veličina zrna približno $0,01$ mm pa nema smisla pretpostavljati veličinu pukotine ispod te vrijednosti. U slučaju modela nastanka-širenja pukotine, odabire se početna veličina pukotine koja je po iznosu jednaka veličini pukotine na kraju perioda nastanka pukotine. Prema *notch strain* analizi, promatra se vrijeme do nastanka pukotine dužine 1 mm i dubine oko $0,5$ mm. Kod proračuna širenja pukotine, BS7910 [103] preporučuje početnu veličinu pukotine a_i između $0,1$ i $0,25$ mm.

4. Zaključak

Na temelju pregleda dostupne literature o HFMI metodi obrade zavarenih priključaka izloženih umoru, može se zaključiti sljedeće:

- Obrada zavarenih priključaka mehaničkim udarom visoke frekvencije jednostavna je i ekonomična metoda poboljšanja otpornosti zavarenih priključaka izloženih umoru, a ponekad može biti i jedino preostalo rješenje kada nije moguće ostvariti dostatnu otpornost na umor klasičnim pravilima projektiranja.
- Poboljšanje otpornosti na umor se očituje kroz povećanje radijusa ruba zavaru (smanjenje koncentracije naprezanja),

unos tlačnih zaostalih naprezanja kojima se umanjuju ili uklanjaju nepovoljna vlačna zaostala naprezanja nastala procesom zavarivanja te očvršćivanje zbog hladnog oblikovanja materijala gdje se lokalno povećava granica popuštanja materijala (proporcionalno s porastom kvalitete čelika).

- Za razliku od neobrađenih zavarenih priključaka, čvrstoća čelika sudjeluje u doprinosu otpornosti na umor obrađenih zavarenih priključaka izloženih umoru, što je posebice znatno pri upotrebi čelika visoke čvrstoće.
- Potrebno je dodatno istražiti pouzdanost obrađenih zavarenih priključaka za konstantne i promjenjive amplitude naprezanja, kakve se javljaju u realnim konstrukcijama.
- Potrebno je dodatno istražiti kombinirani utjecaj zaostalih naprezanja te stupanj opuštanja uslijed različitih vrsta opterećenja, geometrije ruba zavaru te očvršćivanja materijala zbog hladnog oblikovanja kako bi se preciznije procijenio stupanj poboljšanja otpornosti zavarenih priključaka na umor.
- Bolje razumijevanje svega navedenog nastaviti će promicati implementaciju HFMI metode u građevinarstvu i drugim industrijama te će omogućiti napredak u standardizaciji postupka primjene i razvoj novih smjernica za procjenu umora obrađenih zavarenih priključaka.
- Treba napomenuti da zbog nedovoljne količine rezultata ispitivanja različitih uzoraka postoji i dalje određeni stupanj neizvjesnosti rezultata procjene umora. Zbog toga je, uz dodatna laboratorijska ispitivanja, potrebno razviti i probabilističke modele te procijeniti stupanj neizvjesnosti za svakodnevne inženjerske primjene.
- Posebna se pozornost mora usmjeriti na pojedinačna opterećenja koja mogu znatno opustiti tlačna zaostala naprezanja i tako utjecati na stupanj poboljšanja otpornosti. Ovo je potrebno uzeti u obzir prilikom procjene umora, posebice ako se razmatraju promjenjive amplitude naprezanja dobivene iz spektra naprezanja.
- Dosadašnja istraživanja su pokazala korist HFMI metode u povećanju čvrstoće kod umora zavarenih priključaka pri konstantnim amplitudama i niskom omjeru naprezanja. Međutim, ograničeno je znanje o utjecaju visokih omjera naprezanja i promjenjivih amplituda te različitih mehanizama poput relaksacije zaostalih naprezanja, poboljšanja geometrije te očvršćivanja deformacija na stupanj poboljšanja otpornosti na umor.
- Razumijevanje kombiniranog i zajedničkog utjecaja zaostalih naprezanja, lokalne geometrije ruba zavaru te očvršćivanja deformacija jest ključno za određivanje utjecaja visokih omjera naprezanja i vršnih naprezanja na stupanj poboljšanja zavarenih konstrukcija HFMI metodom.

LITERATURA

- [1] Schijve, J.: *Fatigue of Structures and Materials*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [2] Ye, X., Su, Y., Han, J.: A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Assessment of Steel Bridges, pp.1-13, 2014, <https://doi.org/10.1155/2014/956473>.
- [3] Radaj, D., Sonsino, C.M., Fricke, W.: *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*, 2nd Edition, Abington, Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2006
- [4] Fuštar, B., Lukačević, I., Dujmović, D.: Review of fatigue assessment methods for welded steel structures Fatigue of welded joints. *Hindawi Adv Civ Eng*, pp.1-16, 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/3597356>.
- [5] Cui, W.: A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures, *J Mar Sci Technol*, 7 (2002), pp.43-56, <https://doi.org/10.1007/s007730200012>.
- [6] Yildirim, H.C.: Recent results on fatigue strength improvement of high-strength steel welded joints. *Int J Fatigue*, 101 (2017), pp.408-420, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.10.026>.
- [7] Hobbacher, A.: *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*, 2016, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2>.
- [8] EN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-9: Fatigue. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization CEN.; 2005.
- [9] American Bureau of Shipping. Commentary on the guide for the fatigue assessment of offshore structures; January 2004-updated 2010. n.d.
- [10] Recommended practice Det Norske Veritas, DNV-RP-C203 fatigue design of offshore steel structures; April 2016. n.d.
- [11] British Standards Institute. Steel, concrete and composite bridges: Part 10- Code of practice for fatigue. London: BSI; 1980. n.d.
- [12] Marquis, G.B., Barsoum, Z.: IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints. In: IIW Recommendations for the HFMI Treatment. IIW Collection. Springer, Singapore n.d., 2016.
- [13] Ghahremani, K., Walbridge, S.: Fatigue testing and finite element analysis of bridge welds retrofitted by peening under load. *Struct Congr 2012 - Proc 2012 Struct Congr*, 2012, pp. 648-656, <https://doi.org/10.1061/9780784412367.058>.
- [14] Haagen, P.J., Maddox, S.J.: IIW Recommendations On Methods for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints: IIW-2142-10. 2013.
- [15] Kolstein M.H.: *Fatigue Classification of Welded Joints in Orthotropic Steel Bridge Decks*, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, Netherlands, 2007, Ph.D. thesis.
- [16] Dahle, T.: Design fatigue strength of TIG-dressed welded joints in high-strength steels subjected to spectrum loading, *Int J Fatigue*, 20 (1998), pp. 677-681, [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(98\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00031-0).
- [17] Ramalho, A.L., Ferreira, J.A.M., Branco, C.A.G.M.: Fatigue behaviour of T welded joints rehabilitated by tungsten inert gas and plasma dressing. *Mater Des*, 32 (2011), pp. 4705-4713, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.051>.
- [18] Huther, I., Lieurade, H.P., Souissi, R., Nussbaumer, A., Chabrolin, B., Janosch, J.J.: Analysis of results on improved welded joints. *Weld World*, 37 (1996) 5, pp. 242-266.
- [19] Yildirim, H.C., Marquis, G., Sonsino, C.M.: *Lightweight Design with Welded High-Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treated High-Strength Steel Joints from S700 under Constant and Variable Amplitude Loadings*, *Int J Fatigue*, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.11.009>.
- [20] Statnikov, E.S., Shevtsov, U.M., Kulikov, V.F.: Ultrasonic impact tool for welds strengthening and reduction of residual stresses, *Publications Scientific Works: Metallurgy, SEVMASH, USSR*, 92 (1977), pp. 27-29.
- [21] Kudryavtsev, Y.F., Trufyakov, V.I., Mikheev, P., Burenko, A.G.: Ultrasonic impact tool for welds strengthening and reduction of residual stresses, *Int Inst Weld IIW Doc XIII*, pp. 1596-94, 1993.
- [22] Zhao, X., Wang, D., Huo, L.: Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment. *Mater Des*, 32 (2011), pp. 88-96, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.030>.
- [23] Wang, T., Wang, D., Huo, L., Zhang, Y.: Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT), *Int J Fatigue*, 31 (2009), pp. 644-650, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.03.030>.
- [24] Roy, S., Fisher, J.W., Yen, B.T.: Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT), *Int J Fatigue*, 25 (2003), pp. 1239-1247, [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00151-8](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00151-8).
- [25] Lihavainen, V.M., Marquis, G., Statnikov, E.S.: Fatigue strength of a longitudinal attachment improved by ultrasonic impact treatment, *Weld World*, 48 (2004), pp. 67-73, <https://doi.org/10.1007/BF03266434>.
- [26] Leitner, M., Stoschka, M., Eichlseder, W.: Fatigue enhancement of thin-walled, high-strength steel joints by high frequency mechanical impact treatment, *Weld World*, 2013, <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s40194-013-0097-4>.
- [27] Bousseau, M., Millot, T.: Fatigue life improvement of welded structures by ultrasonic needle peening compared to TIG dressing. *IIW Doc XIII-2125-06*; 2006 n.d.
- [28] Walbridge, S.: A probabilistic study of fatigue in post-weld treated tubular bridge structures (EPFL Phd Thesis No. 3330). Phd thesis, EPFL. Wampler n.d., 2005.
- [29] Abdullah, A., Malaki, M., Eskandari, A.: Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening, *Mater Des*, 38 (2012), pp. 7-18, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.040>.
- [30] Mikkola E.: A study on effectiveness limitations of high-frequency mechanical impact, Aalto University School of Mechanical Engineering, Espoo, Finland, 2016, Ph.D. thesis.
- [31] Marquis, G., Barsoum, Z.: Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: Proposed procedures and quality assurance guidelines, *Weld World*, 58 (2014), pp. 19-28, <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0077-8>.
- [32] Ghahremani, K., Walbridge, S., Topper, T.: High cycle fatigue behaviour of impact treated welds under variable amplitude loading conditions, *Int J Fatigue*, 81 (2015), pp. 128-142, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.07.022>.
- [33] Vilhauer, B., Bennett, C.R., Matamoros, A.B., Rolfe, S.T.: Fatigue behavior of welded coverplates treated with Ultrasonic Impact Treatment and bolting, *Eng Struct*, 34 (2012), pp. 163-72, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.009>.

- [34] Roy, S., Fisher, J.W.: Modified AASHTO design S-N curves for post-weld treated welded details, *Bridg Struct*, 2 (2006), pp. 207-222, <https://doi.org/10.1080/15732480601103630>.
- [35] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBAU - Fatigue design of welded joints subjected to High Frequency Mechanical Impact Treatment - DAST- Guideline, 2019. n.d.
- [36] Harati, E., Svensson, L., Karlsson, L., Hurtig, K.: Effect of HFMI treatment procedure on weld toe geometry and fatigue properties of high strength steel welds, *Procedia Struct Integr*, 2 (2016), pp. 3483-3490, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.434>.
- [37] Barsoum, Z., Jonsson, B.: Influence of weld quality on the fatigue strength in seam welds, *Eng Fail Anal*, 18 (2011), pp. 971-979, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.12.001>.
- [38] Mikkola, E., Remes, H., Marquis, G.: A finite element study on residual stress stability and fatigue damage in high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joint, *Submitt to Int J Fatigue*, 94 (2017), pp. 16-29, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.09.009>.
- [39] Yildirim, H.C., Marquis, G.B.: A round robin study of high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joints subjected to variable amplitude loading, *Weld World*, 57 (2013), pp. 437-447, <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0045-3>.
- [40] Leitner, M.: Influence of effective stress ratio on the fatigue strength of welded and HFMI-treated high-strength steel joints, *Int J Fatigue*, 102 (2017), pp. 158-170, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.03.008>.
- [41] Cheng, X., Fisher, J.W., Prask, H.J., Gnäupel-Herold, T., Yen, B.T., Roy, S.: Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures, *Int J Fatigue*, 25 (2003), pp. 1259-1269, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.08.020>.
- [42] Turski, M., Clitheroe, S., Evans, A.D., Rodopoulos, C., Hughes, D.J., Withers, P.J.: Engineering the residual stress state and microstructure of stainless steel with mechanical surface treatments, *Appl Phys A Mater Sci Process*, 99 (2010), pp. 549-556, <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5672-6>.
- [43] Liu, C., Ge, Q., Chen, D., Gao, F., Zou, J.: Residual stress variation in a thick welded joint after ultrasonic impact treatment, *Sci Technol Weld Join*, 21 (2016), pp. 624-631, <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1149932>.
- [44] Foehrenbach, J., Hardenacke, V., Farajian, M.: High frequency mechanical impact treatment (HFMI) for the fatigue improvement: numerical and experimental investigations to describe the condition in the surface layer, *Weld World*, 60 (2016), pp. 749-755, <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0338-4>.
- [45] Dekhtyar, A.I., Mordiyuk, B.N., Savvakina, D.G., Bondarchuk, V.I., Moiseeva, I.V., Khripta, N.I.: Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy by applying ultrasonic impact treatment, *Mater Sci Eng A*, 641 (2015), pp. 348-359, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.072>.
- [46] Kuhlmann, U., Dürr, A., Günther, H.P.: Improvement of fatigue strength of welded high strength steels by application of post-weld treatment methods, 92 (2006), pp. 25-32.
- [47] Weich, I., Ummenhofer, T., Nitschke-Pagel, T., Chalandar, H.E., Dilger, K.: Fatigue behaviour of welded high-strength steels after high frequency mechanical post-weld treatments, *Weld World*, 53 (2009), <https://doi.org/10.1007/BF03263475>.
- [48] Okawa, T., Shimanuki, H., Funatsu, Y., Nose, T., Sumi, Y.: Effect of preload and stress ratio on fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment, *Weld World*, 57 (2013), pp. 235-241, <https://doi.org/10.1007/s40194-012-0018-y>.
- [49] Weich, I.I.: Henry Granjon Prize Competition 2009 Winner Category C: "Design and Structural Integrity" EDGE Layer Condition and Fatigue Strength of welds improved by mechanical post-weld treatment, *Weld World*, 55 (2011), pp. 3-12.
- [50] Ghahremani, K., Safa, M., Yeung, J., Walbridge, S., Haas, C., Dubois, S.: Quality assurance for high-frequency mechanical impact (HFMI) treatment of welds using handheld 3D laser scanning technology, *Weld World*, 59 (2015), pp. 391-400, <https://doi.org/10.1007/s40194-014-0210-3>.
- [51] Zheng, J., Ince, A., Tang, L.: Modeling and simulation of weld residual stresses and ultrasonic impact treatment of welded joints, *Procedia Eng.*, 213 (2018), pp. 36-47, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.005>.
- [52] Guo, C., Wang, Z., Wang, D., Hu, S.: Numerical analysis of the residual stress in ultrasonic impact treatment process with single-impact and two-impact models, *Appl Surf Sci*, 347 (2015), pp. 596-601, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.128>.
- [53] Mordiyuk, B.N., Iefimov, M.O., Prokopenko, G.I., Golub, T.V., Danylenko, M.I.: Structure, microhardness and damping characteristics of Al matrix composite reinforced with AlCuFe or Ti using ultrasonic impact peening, *Surf Coatings Technol*, 204 (2010), pp. 1590-1598, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.10.009>.
- [54] Sonsino, C.M.: Effect of residual stresses on the fatigue behaviour of welded joints depending on loading conditions and weld geometry, *Int J Fatigue*, 31 (2009), pp. 88-101, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.02.015>.
- [55] Ghahremani, K., Walbridge, S.: Fatigue testing and analysis of peened highway bridge welds under in-service variable amplitude loading conditions, *Int J Fatigue*, 33 (2011), pp. 300-312, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.09.004>.
- [56] McClung, R.C.: A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 30 (2007), pp. 173-205, <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01102.x>.
- [57] Manteghi, S., Maddox, S.J.: Methods for Fatigue Life Improvement of Welded Joints in Medium and High Strength Steels. International Institute of Welding, IIW document XIII-2006-04, Paris, 2004.
- [58] Ishikawa, T., Shimizu, M., Tomo, H., Kawano, H., Yamada, K.: Effect of compression overload on fatigue strength improved by ICR treatment, *Int J Steel Struct*, 213 (2013), pp. 175-181, <https://doi.org/10.1007/s13296-013-1016-7>.
- [59] Farajian-Sohi, M., Nitschke-Pagel, T., Dilger, K.: Residual Stress Relaxation of Quasi-Statically and Cyclically-Loaded Steel Welds. *Weld World* 54, R49-R60 (2010), <https://doi.org/10.1007/BF03263484>.
- [60] Khurshid, M., Leitner, M., Barsoum, Z., Schneider, C.: Residual stress state induced by high frequency mechanical impact treatment in different steel grades - Numerical and experimental study, *Int J Mech Sci*, 123 (2017), pp. 34-42, <https://doi.org/10.1016/j.jimecsci.2017.01.027>.
- [61] Harati, E., Svensson, L.E., Karlsson, L., Widmark, M.: Effect of high frequency mechanical impact treatment on fatigue strength of welded 1300 MPa yield strength steel, *Int J Fatigue*, 92 (2016), pp. 96-106, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.06.019>.
- [62] Mikkola, E., Marquis, G., Lehto, P., Remes, H., Hänninen, H.: Material characterization of high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated high-strength steel, *Mater Des*, 89 (2016), pp. 205-214, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.001>.
- [63] Zhang, H., Wang, D., Xia, L., Lei, Z., Li, Y.: Effects of ultrasonic impact treatment on pre-fatigue loaded high-strength steel welded joints, *Int J Fatigue*, 80 (2015), pp. 278-287, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.06.017>.

- [64] Yildirim, H.C., Marquis, G.B.: Overview of Fatigue Data for High Frequency Mechanical Impact Treated Welded Joints, *Weld World*, 56 (2013) 82, <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF03321368>.
- [65] Yin, D., Wang, D., Jing, H., Huo, L.: The effects of ultrasonic peening treatment on the ultra-long life fatigue behavior of welded joints, *Mater Des*, 31 (2010), pp. 3299-3307, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.02.006>.
- [66] Shams Hakimi, P., Al-Emrani, M.: Post weld treatment-Implementation on bridges with special focus on HFMI. Chalmers University of Technology; 2014.
- [67] Shams-Hakimi, P., Yildirim, H.C., Al-Emrani, M.: The thickness effect of welded details improved by high-frequency mechanical impact treatment, *Int J Fatigue*, 99 (2017), pp. 111-124, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.02.023>.
- [68] Lotsberg, I.: Assessment of the size effect for use in design standards for fatigue analysis, *Int J Fatigue*, 66 (2014), pp. 86-100, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.03.012>.
- [69] Fricke, W.: Recent developments and future challenges in fatigue strength assessment of welded joints, *Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci*, 229 (2015), pp. 1224-1239, <https://doi.org/10.1177/0954406214550015>.
- [70] Mashiri, F.R., Zhao, X.L.: Thickness Effect In Welded Joints-A Review. International Society of Offshore and Polar Engineers. 2005.
- [71] Ghahremani, K., Ranjan, R., Walbridge, S., Ince, A.: Fatigue Strength Improvement of Aluminum and High Strength Steel Welded Structures using High Frequency Mechanical Impact Treatment, *Procedia Eng*, 133 (2015), pp. 465-76, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.616>.
- [72] Yildirim, H.C., Marquis, G.B.: Fatigue strength improvement factors for high strength steel welded joints treated by high frequency mechanical impact, *Int J Fatigue*, 44 (2012), pp. 168-76, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.05.002>.
- [73] Downing, S.D., Socie, D.F.: Simple rainflow counting algorithms, *Int J Fatigue*, 4 (1982), pp. 31-40, [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(82\)90018-4](https://doi.org/10.1016/0142-1123(82)90018-4).
- [74] Miner, M.A.: Cumulative damage in fatigue, *J Appl Mech*, 12 (1945), pp. 159-64.
- [75] Marquis, G.: Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds, *Eng Fract Mech*, 77 (2010), pp. 2051-2062, <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2010.03.034>.
- [76] Mikkola, E., Doré, M., Khurshid, M.: Fatigue strength of HFMI treated structures under high R-ratio and variable amplitude loading, *Procedia Eng*, 66 (2013), pp. 161-70, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.071>.
- [77] Niemi, E., Fricke, W., Maddox, S.J.: Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide to the Structural Hot-Spot Stress Approach, 2018, <https://doi.org/10.1533/9781845696665>.
- [78] Hobbacher, A.: IIW document IIW-1823-07 Fatigue Design of Welded Joints and Components, 2008.
- [79] Deng, C., Liu, Y., Gong, B., Wang, D.: Numerical implementation for fatigue assessment of butt joint improved by high frequency mechanical impact treatment: A structural hot spot stress approach, *Int J Fatigue*, 92 (2016), pp. 211-219, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.07.008>.
- [80] Deng C, Niu Y, Gong B, Liu Y, Wang D. Numerical assessment of fatigue design curve of welded T-joint improved by high-frequency mechanical impact (HFMI) treatment. *Adv Eng Softw*, 114 (2017), pp. 154-162, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.06.017>.
- [81] Sonsino, C.M., Fricke, W., De Bruyne, F., Hoppe, A., Ahmadi, A., Zhang, G.: Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints - Background and applications, *Int J Fatigue*, 34 (2012), pp. 2-16, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.04.011>.
- [82] Fricke, W.: Fatigue strength assessment of local stresses in welded joints, *Fract Fatigue Welded Joints Struct*, pp. 115-138, 2011, <https://doi.org/10.1533/9780857092502.2.115>.
- [83] Fricke, W.: IIW recommendations for the fatigue assessment of welded structures by notch stress analysis: IIW-2006-09 2012, <https://doi.org/10.1533/9780857098566.3>.
- [84] Hobbacher, A.F.: The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components - A comprehensive code recently updated, *Int J Fatigue*, 31 (2009), pp. 50-58, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.04.002>.
- [85] Yildirim, H.C., Marquis, G.B.: Notch stress analyses of high-frequency mechanical impact-improved welds by using $f = 1$ mm and $f = +1$ mm approaches, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 37 (2014), pp. 561-569, <https://doi.org/10.1111/ffe.12139>.
- [86] Leitner, M., Simunek, D., Shah, S.F., Stoschka, M.: Numerical fatigue assessment of welded and HFMI-treated joints by notch stress/strain and fracture mechanical approaches, *Adv Eng Softw*, 120 (2016), pp. 96-106, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.022>.
- [87] Seeger, T., Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise (Fundamentals for service fatigue strength assessments), *Stahlbau Handbuch (Handbook of Structural Engineering)*, Köln, Stahlbau-Verlagsges, 1B (1996), pp. 5-123.
- [88] Dowling, N.E.: Mechanical Behaviour of Materials - Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1993. n.d.
- [89] Neuber, H.: Kerbspannungslehre, Berlin, Springer-Verlag, 1937, 1958, and 1985. 253 Neuber H, Theory of Notch Stresses, *Ann Arbor Mich, Edwards*, 1946. n.d.
- [90] Peterson, R.E.: Stress Concentration Factors, New York, John Wiley, 1953 and 1974. n.d.
- [91] Peterson, R.E.: Notch sensitivity, *Metal Fatigue*, New York, McGraw Hill, 1959, pp. 293-306.] n.d.
- [92] Ramberg, W., Osgood, W.R.: Description of stress-strain curves by three parameters, *Techn Rep 902*, NACA, 1943. n.d.
- [93] Bauschinger, J.: Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken, Quetschen, Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Belastung, *Mitt Mech-Tech Lab*, 1886, 13, Munich. n.d.
- [94] Masing, G.: Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing/, *Proceedings International Congress of Applied Mechanics*, Zürich, 1926, pp. 332-335. n.d.
- [95] Manson, S.S.: Fatigue - a complex subject - some simple approximations, *Exp Mech*, 5 (1965) 7, pp. 193-226.
- [96] Coffin, L.F.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, *Trans ASME*, 76 (1954) 6, pp. 931-950.
- [97] Coffin, L.F.: Fatigue in machines and structures - power generation, *Fatigue and Microstructure*, Materials Park, ASM, 1979, pp 1-27., Morrow J D, Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals, *ASTM STP 378*, Philadelphia Pa, ASTM, 1965, pp. 45-87.
- [98] Chattopadhyay, A., Glinka, G., El-Zein, M., Qian, J., Formas, R.: Stress Analysis and Fatigue of welded structures, *Weld World*, 55 (2011), pp. 2-21, <https://doi.org/10.1007/BF03321303>.
- [99] Kim, K.S., Chen, X., Han, C., Lee, H.W.: Estimation methods for fatigue properties of steels under axial and torsional loading, *Int J Fatigue*, 24 (2002), pp. 783-793, [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00190-6](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00190-6).

- [100] Baumel, A.Jr., Seeger, T.: Materials data for cyclic loading, Supplement I. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990.
- [101] Roessle, M.L., Fatemi, A.: Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations, International Journal of Fatigue, 22 (2000;), pp. 495-511.
- [102] Lassen, T., Recho, N.: Fatigue Life Analyses of Welded Structures. London: Iste, 2006.
- [103] British Standards Institution, Guidance on Methods for the Acceptance of Flaws in Structure, PD 6493, BS 7910, Appendix J, 2005. n.d.